

АНАЛІЗ АДАПТИВНИХ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ХІМІЧНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

БОБУХ А. О.

aabobukh@ukr.net.

кандидат технічних наук, доцент,

професор кафедри автоматизації технологічних систем та екологічного моніторингу,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

м. Харків, Україна

ПЕРЕВЕРЗЄВА А. М.

pereverzieva_alya@ukr.net

аспірант кафедри автоматизації технологічних систем та екологічного моніторингу,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

м. Харків, Україна

Більшість сучасних комп'ютерно-інтегрованих хімічних технологій, зокрема комп'ютерно-інтегровану технологію виробництва кальцинованої соди, слід відносити до нелінійних та нестационарних, оскільки в залежності від режимів та часу роботи процеси в цих технологіях управління описуються інтегральними, диференціальними або еквівалентними їм рівняннями із перемінними коефіцієнтами (рівняннями регресії). Одною з основних особливостей хімічних технологій (ХТ) управління є наявність високого рівня апіорної невизначеності відносно їх характеристик та великою кількістю вимірювань вхідних та вихідних параметрів. Адаптивне управління такими ХТ реалізується із використанням методів активної або пасивної ідентифікації.

Виконані дослідження свідчать про те, що адекватним математичним апаратом для вирішення проблеми аналізу оптимальних законів управління в умовах апіорної невизначеності може стати теорія адаптивних методів управління [1 – 4]. ХТ з невизначеністю відносно її характеристик як лінійна динамічна стохастична технологія може бути описана рівнянням вигляду:

$$y(k) = a_1 y(k-1) + \dots + a_{N_A} y(k-N_A) = b_1 u(k-1) + \dots + b_{N_B} u(k-N_B) + w(k), \quad (1)$$

де $y(k)$ – контрольований вихід ХТ, $u(k - 1)$ – вхід ХТ (вихід регулятора), $a_1, a_2, \dots, a_{N_A}, b_1, b_2, \dots, b_{N_B}$ – параметри ХТ, $w(k)$ – випадкова нормально розподілена завада типу «білого» гаусовського шуму, така що $M\{w(k)\} = 0$, $M\{w^2(k)\} = \sigma_w^2$, $M\{\cdot\}$ – символ математичного очікування, $k = 0, 1, 2, \dots$ – дискретний час.

У рівнянні (1) представлена найбільш проста модель «кольорового» шуму. В роботах [1, 4] розглянуті моделі збурення такого шуму, які інтерпретуються як пропущений через лінійний фільтр «білий» шум. Такого роду процеси отримали назву авторегресії – ковзного середнього та записуються рівнянням вигляду:

$$n(k) + c_1 n(k - 1) + \dots + c_{N_C} n(k - N_C) = w(k) + d_1 w(k - 1) + \dots + d_{N_D} w(k - N_D), \quad (2)$$

де $n(k)$ та $w(k)$ – послідовності реалізацій ХТ «кольорового» та «білого» шумів відповідно.

Для реалізації блоків управління ХТ застосовуються пропорційні (П-), пропорційно-інтегральні (ПІ-) або пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД-) регулятори, що дозволяє використовувати накопичений досвід роботи з аналоговими регуляторами та використовувати відомі правила їх настроювання [5–7].

Факторами, які зумовили широке застосовування, особливо ПІД-регуляторів, стали простота їх структури та висока надійність. Але ці регулятори мають також деякі недоліки. Основні із них: необхідність ручної переналадки параметрів цього регулятора при зміні параметрів ХТ або зовнішніх збурень, при цьому трудність переналадки значно збільшується, якщо ХТ характеризується наявністю внутрішніх взаємодіючих контурів. Окрім того, алгоритми отримання оцінок параметрів ПІД-регуляторів також мають недоліки. Так, метод Зіглера-Нікольса [2 – 4] чутливий до шумів, оскільки його оцінки засновані на результатах промислових експериментів із розімкненою технологією, а для реалізації методу Нішікави [1], коли потрібна переналадка

параметрів ПД-регулятора, необхідне втручання оператора для формування тестових вхідних сигналів.

Тому ефективними можуть бути методи адаптивного управління ХТ. Основна ідея цього управління полягає в зміні параметрів регулятора в залежності від критерію оптимальності замкненої технології. Перші адаптивні регулятори були розроблені на основі класичної теорії автоматичного управління та теорії управління нелінійними технологіями, при цьому вплив шуму ураховувався шляхом його апроксимації деякими тестовими сигналами.

Сучасні адаптивні регулятори створюються з використанням статистичних моделей для оцінки зміни параметрів як ХТ, так і шумів. Розрахунок закону управління виконується на основі двох принципів, перший називається еквівалентом визначеності, а другий – гіпотезою роздільності. Принцип еквіваленту визначеності застосовується тоді, коли є можливість спочатку вирішити детерміновану задачу з відомими параметрами, а потім визначити оптимальний тип регулятора, параметри якого треба замінити їх оцінками, при цьому невизначеність поточних оцінок ігнорується. Гіпотеза роздільності оснований на апріорному допущенні, що аналіз адаптивних методів ХТ можна розділити на дві частини: ідентифікації та управління. При цьому параметри регулятора звичайно є функціями параметрів, що ідентифікуються, ХТ. Для оцінки параметрів ХТ використовуються різні методи ідентифікації, зокрема: метод найменших квадратів, узагальнений метод найменших квадратів, метод інструментальних змінних, фільтр та розширений фільтр Калмана тощо [1–7].

Широке розповсюдження отримали адаптивні системи управління з ідентифікатором в контурі [1–7]. Для розгляду лінійної динамічної стохастичної ХТ, запишемо вираз для його виходу ($y(k)$) у вигляді [4–7]:

$$y(k) = \theta^T q(k) + w(k), \quad (3)$$

де $\theta = (a_1, a_2, \dots, a_{N_A}, b_1, b_2, \dots, b_{N_B})^T$ – вектор параметрів ХТ,
 $q(k) = (-y(k-1), \dots, -y(k-N_A), u(k-1), \dots, u(k-N_B))^T$ – вектор стану ХТ; інші
 позначення дивись формулу (1).

Поставимо в відповідність ХТ модель, яка настраюється, у вигляді:

$$y(k) = \theta^T (k-1) q(k), \quad (4)$$

де $y(k)$ – вихід моделі; $\theta(k-1) - (N_A + N_B)$ – мірний вектор параметрів моделі, які настраюються.

Формулу (4) можна також отримати, якщо використовувати другі описи технологій, якими управляють. Тоді, розглядаючи критерій (J) (5) у вигляді:

$$J_k = M \{ (y(k) - \hat{y}(k))^2 \} = M \{ (y(k) - \theta^T (k-1) q(k))^2 \} \quad (5)$$

та виконавши мінімізацію його за θ , отримаємо оптимальний за швидкодією
 однокроковий алгоритм Качмажа, а мінімізація критерію (5):

$$J_k = \sum_{i=0}^k (y(i) - \theta^T (i-1) q(i))^2 \quad (6)$$

приводить до рекурентного методу найменших квадратів (РМНК) [6].

На жаль, не існує спільного способу порівняння різних адаптивних методів управління ХТ, але можна виділити три основних: аналітичне дослідження (як правило, асимптотичне), імітаційне моделювання та тестування на реальних даних [1–3]. Не існує також єдиного критерію порівняння цих методів. Отримуючи оцінки невідомих коефіцієнтів математичної моделі, блок настроювання параметрів регулятора виконує корекцію до отримання потрібної якості процесів управління. Таким чином, адаптивний регулятор із самонастроюванням змінює закон управління, настраюючи свої коефіцієнти під управляючу технологію. При вирішенні задачі настроювання параметрів регулятора використовуються ті ж самі підходи, що і для традиційних

неадаптивних технологій: забезпечення заданого розташування полюсів замкненої технології, використання правила настроювання, оптимізація прийнятого критерію якості управління тощо.

Нелінійність та нестационарність рівнянь, які описують реальні ХТ, призводять до того, що при управлінні ними значення параметрів регулятора вибирають такими, щоб забезпечити найкраще управління в деякій компромісній точці. Для оптимізації ж технології в декількох точках необхідно виконувати корекцію параметрів регулятора відповідно зміненню робочих умов. А тому для вирішення задачі управління такими технологіями доцільно застосовувати адаптивний підхід, при якому складна нелінійна модель замінюється лінійною моделлю із змінними параметрами, оцінювання яких виконується в реальному часі.

Для опису такої моделі звичайно використовують рівняння псевдолінійної регресійної моделі виду, який показано за формулою (3), але тоді [4]: $\theta(k)$ – в загальному випадку нестационарний вектор параметрів, який підлягає оцінюванню; $q(k)$ – узагальнений вектор вхідних параметрів моделі; $w(k)$ – завади вимірювання, тобто до вигляду за формулою (3) можна привести різні рівняння, що описують лінійні та нелінійні динамічні ХТ [1].

З урахуванням вище наведеного в якості основної процедури адаптивної ідентифікації використовується РМНК [6] у вигляді:

$$\theta(k) = \theta(k-1) + \frac{P(k-1)q(k)}{1 + q^T(k)P(k-1)q(k)} [y(k) - \theta^T(k-1)q(k)], \quad (7)$$

$$P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1)q(k)q^T(k)P(k-1)}{1 + q^T(k)P(k-1)q(k)}, \quad (8)$$

та різні його модифікації (позначення дивись вище).

Модифікація РМНК пов'язана з необхідністю оцінювання параметрів ХТ, які змінюються в часі. Для цього до них додають деякий механізм, котрий надає більшу вагу інформації, яка надходить, наступним чином:

$$J = \sum_{i=1}^k \lambda(k-i) \left(y(k-i) - \theta^T q(k-i) \right)^2, \quad (9)$$

де $\lambda(k-i)$ – функція вірогідності i -того виміру відносно поточного моменту часу k .

Для зручності реалізації розрахункових процедур, а також фізичного тлумачення моделі та її особливостей, функцію $\lambda(k-i)$ частіше всього задають у двох варіантах:

у вигляді «експоненціального зменшення цінності інформації»:

$$\lambda(k-i) = \lambda^{k-i}, \quad 0 \leq \lambda \leq 1; \quad (10)$$

у вигляді «поточного вікна» розміром χ :

$$\lambda(k-i) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 0 \leq i \leq \chi \\ 0, & \text{якщо } \chi < i \leq k. \end{cases} \quad (11)$$

де χ – останні вимірювання.

Застосовується також модифікація РМНК, в якій використовується «експоненціальне зважування інформації» у вигляді:

$$\theta(k) = \theta(k-1) + \frac{P(k-1)q(k)}{\lambda(k) + g(k)} e(k); \quad (12)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} \left[P(k-1) - \frac{P(k-1)q(k)q^T(k)P(k)}{\lambda + g(k)} \right]. \quad (13)$$

Більше простими та достатньо ефективними є наступні два алгоритми.

Проекційний алгоритм оцінювання, який називають алгоритмом Качмажа, для ідентифікації лінійних технологій [3–5], який має вигляд (14) та використовує проекційну операцію на вектор $q(k)$:

$$\theta(k) = \theta(k-1) + \frac{y(k) - \theta^T(k-1)q(k)}{\|q(k)\|^2} q(k), \quad (14)$$

В той самий час алгоритм (14) не використовує матричних обчислень, а наявність в ньому проекційної операції робить його найбільше швидкодіючим серед однокрокових алгоритмів. Наявність завад вимірювання приводє до необхідності модифікації алгоритму за формулою (14), шляхом впровадження до нього деякого параметру $\gamma(k) \in (0, 2)$, до вигляду:

$$\theta(k) = \theta(k-1) + \gamma(k) \frac{y(k) - \theta^T(k-1)q(k)}{\|q(k)\|^2} q(k). \quad (15)$$

Оскільки при ідентифікації реальних ХТ доводиться виконувати стандартизацію, тобто центрування та нормування вхідних та вихідних параметрів, можливо на деяких тактах виникнення малих значень компонента вектора $q(k)$, який використовується в формулі (15). В цьому випадку $\|q(k)\|^2 \approx 0$ та алгоритм стає чисельно нестійким. Щоб не допустити подібних ситуацій, в знаменник формули (15) необхідно ввести деяку позитивну константу $\alpha > 0$, в результаті отримаємо формулу (16):

$$\theta(k) = \theta(k-1) + \gamma(k) \frac{y(k) - \theta^T(k-1)q(k)}{\alpha + \|q(k)\|^2} q(k), \quad (16)$$

яка забезпечує обчислювальну стійкість алгоритму (16) навіть у випадку $\|q(k)\|^2 = 0$.

Ортогональний проекційний алгоритм, який займає проміжне положення між РМНК та однокроковим проекційним алгоритмом Качмажа [1 – 6], має вигляд:

$$\theta(k) = \theta(k-1) + \frac{P(k-1)q(k)}{q^T(k)P(k-1)q(k)} [y(k) - \theta^T(k-1)q(k)], \quad (17)$$

$$P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1)q(k)q^T(k)P(k-1)}{q^T(k)P(k-1)q(k)}, \quad (18)$$

$$P(0) = I.$$

Матриця $P(k)$, яка використовується в формулах (17) та (18), є також ортогональною проекційною матрицею.

За аналогією з формулою (16) для підвищення обчислювальної стійкості алгоритмів (17) та (18) в їх знаменники введемо позитивну константу $\alpha > 0$, в результаті отримаємо:

$$\theta(k) = \theta(k-1) + \frac{P(k-1)q(k)}{\alpha + q^T(k)P(k-1)q(k)} [y(k) - \theta^T(k-1)q(k)], \quad (19)$$

$$P(k) = P(k-1) - \frac{P(k-1)q(k)q^T(k)P(k-1)}{\alpha + q^T(k)P(k-1)q(k)}, \quad (20)$$

$$\alpha > 0.$$

Вибір $\alpha = 1$ приводить до рекурентному методу найменших квадратів.

Усі розглянуті рекурентні алгоритми отримують шляхом мінімізації квадратичного функціоналу та використовують для побудови їх оцінок безпосередні виміри вхідних та вихідних параметрів ХТ.

В результаті досліджень встановлено, що оптимальним за швидкістю можна вважати однокроковий алгоритм управління Качмажа з мінімізацією його за допомогою модифікацій рекурентного методу найменших квадратів та реалізацією на сучасних багатофункціональних мікропроцесорних контролерах.

Впровадження цього алгоритму при розробці комп'ютерно-інтегрованих хімічних технологій, зокрема комп'ютерно-інтегрованої технології виробництва кальцинованої соди [8, 9] буде сприяти ефективному управлінню ними та підвищенню їх енергозбереження.

Використана література:

1. Richard C. Dorf and Robert H. Bishop (2001) Modern control systems. – Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 831 p.
2. Жиров М.В, В.В. Макаров, В.В. Солдатов. Идентификация и адаптивное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами. / М.В. Жиров, В.В. Макаров, В.В. Солдатов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 203с.
3. Тюкин И. Ю., Терехов И. Ю. Адаптация в нелинейных динамических системах: монография / И. Ю. Тюкин, И. Ю. Терехов И. Ю. – СПб. : ЛКИ, 2008. – 384 с.
4. Frederic D. (2010) Systems modeling: analysis and operations research. – Modeling and Simulation Fundamentals: Published Online No 6, pp. 147–180, doi: 10.1002/9780470590621.ch6
5. Kushner H.J., Yin G. G. (2003) Stochastic Approximation and Recursive Algorithms and Applications. – New-York: Springer-Verlag-New-York-Inc., 498 p.
6. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 832 с.
7. Соколов Ю. Н. Компьютерное проектирование ПИД-регуляторов / Ю. Н. Соколов. // Авиационно-космическая техника и технология, 2010. – №1(68) . – С. 43 – 45.
8. Переверзева А.М. Розробка математичної моделі статистики технології насичення очищеного розсолу газами виробництва соди / А.М. Переверзева, А.О Бобух. // Вісник НТУ «ХПІ». – Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків. – 2017. – № 32 (1254). – С.68–73. – doi: 10.20998/2413-4295.2017.32.11.
9. Переверзева А.М. Аналіз методів параметричної ідентифікації технологій / А.М. Переверзева, А.О Бобух, О. М. Дзевочко. // Вісник НТУ «ХПІ». – Серія: Інформатика та моделювання. – Харків. – 2018. – № 24 (1300). – С.139–147. – doi: 10.20998/2411-0558.2018.24.12.